

## 学位論文題名

# Observational Study of Distribution and Physical State of Molecular Gas and Secular Evolution in Barred Spiral Galaxies

(棒渦巻銀河における分子ガスの分布と物理状態および  
永続的進化に関する観測的研究)

## 学位論文内容の要旨

### 研究背景

近傍宇宙では、円盤銀河の約60%が棒渦巻銀河であり(de Vaucouleurs 1991)、我々の銀河である銀河系も棒状構造を持つことが知られている(Blitz & Spergel 1991 他)。棒渦巻銀河の内部では、非軸対称な棒状構造の影響により、恒星の原材料となる水素ガスの軌道が歪められ非円運動が強くなる。さらに、棒状構造とガス間の角運動量の交換や、ガス同士の衝突による衝撃波により、ガスが銀河中心へ供給されることや星形成が抑制されることが数値計算を用いた研究から明らかにされている。このように、棒状構造は銀河内部のガスの分布や星形成活動性に影響を与えることが知られており、近傍宇宙の特に孤立した銀河における永続的な進化にとって重要な役割を果たしている。

近年、観測装置の発達により多くの銀河に対して、水素分子ガスのトレーサとなるCO(一酸化炭素)などの分子輝線のマッピング観測が行われ(Kuno et al. 2007 他)、棒渦巻銀河では分子ガスが棒状構造内部に全体に分布するものから、中心の限られた領域にしか存在しないものまで、分子ガスの分布に多様性が見られた。そこで、このような多様性が棒状構造のどのような性質に起因するのか、分子ガスの分布の度合いを数値として評価し、棒状構造の非軸対称性の指標である棒状構造の楕円率と比較した。

さらに、棒渦巻銀河では衝撃波が棒状構造に沿って発達することが知られている(William et al. 1979 他)が、このようなガスの動力学が分子ガスにどのような影響を及ぼすのか、観測的側面からの研究はほとんどない。そこで我々は、複数の種類の分子輝線の観測を行い、銀河の場所毎でどのような違いがあるのかを調べ、さらに星形成活動性とも比較した。

### 棒状構造内部の分子ガス分布

棒状構造と分子ガス分布を比較するために我々は、GDP(Gas Distribution Parameter)という量を以下のような式で定義した。

$$\text{GDP} = \frac{4 \times \int_S I(x, y)(x^2 + y^2) dx dy}{(a^2 + b^2) \times \int_S I(x, y) dx dy} \quad S = \left\{ (x, y) \mid \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \leq 1 \right\}$$

この量は、棒状構造内で分子ガスが広がっている場合は大きく、中心に集中している場合は小さな値をとる。分子ガス輝線のデータは野辺山COアトラス(Kuno et al. 2007)を使用した。棒状構造の楕円

率は、近赤外線 2MASS  $K_s$  バンド (Strutskie et al. 2006) の等光度曲線に対して楕円をフィットすることにより求めた。このようにして得られた、GDP と楕円率 ( $e$ ) をプロットしたものが図 1 である。図 1 は、楕円率が小さい ( $e < 0.5$ ) 銀河では、GDP が 0.64 から 0.86 の間に分布しているのに対し、楕円率が大きい ( $e > 0.5$ ) 銀河では、GDP が 0.45 から 0.91 の間に分布しており、強い棒状構造を持つ銀河ではより銀河中心にガスが集中していることを示している。このことから、我々は、強い棒状構造を持つ銀河では、ガスの中心への供給率が高いのではないかと考え、楕円率が大きい ( $e > 0.5$ ) 銀河間における GDP の大小は、棒状構造が形成されてからの経過時間を反映しているという仮説を立てた。

分子ガスは時間経過とともに自己重力により密度が上昇し、その結果、星形成が開始される。もし、銀河中心へのガス供給効率が高かった場合、星形成による分子ガスの消費があったとしても、供給が始まってからの時間経過が長い銀河ほど銀河中心における高密度分子ガスの割合が高く、一方で供給効率が低い銀河では星形成によってガスは消費される方が早く、高密度ガスの割合が低いと予想される。我々はこの作業仮説を検証するために、GDP を求めた 12 銀河の中心に対して臨界密度が  $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$  で高密度ガスのトレーサである HCN ( $J=1-0$ ) と臨界密度が  $\sim 10^2 \text{cm}^{-3}$  程度の  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) と  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) の観測を、国立天文台野辺山 45m 鏡を用いて行った。

観測の結果、分子ガス全体の質量に対する高密度ガスの質量の割合の指標である、HCN ( $J=1-0$ ) /  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) 比は、0.024 (NGC 4535) から 0.088 (NGC 5236) の間に分布することが明らかになった。この比を GDP-楕円率の図上で比較したものが図 2 であり、特に強い棒状構造を持ち GDP が低い NGC 253 と NGC 3351 は、HCN ( $J=1-0$ ) /  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) 比が 0.083 と 0.081 であり、NGC 5236 を除く GDP が高い銀河より、比が高く高密度ガスの割合が高いことが明らかになった。これは、我々の予想を支持する結果であり、棒渦巻銀河では分子ガスの分布を決定する要因は棒状構造の非軸対称の強さと棒状構造が形成されてからの経過時間である可能性が高く、さらに kpc スケールの分子ガス分布と銀河中心における分子ガス濃度の共進化を示唆するものである。

## 棒渦巻銀河の分子ガスと星形成

次に棒状構造が中心以外の領域に与える影響を調べる。系外銀河に対する分子輝線観測は、これまでほとんどが最も強い  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) の観測であった。 $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) は強度が非常に強いため、分子ガスの分布や速度構造を調べるためには適した分子輝線であるが、光学的に厚く分子ガスの表面しかトレースしておらず、分子ガスの物理的性質についてはほとんど情報が得られない。そこで我々は、 $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) の観測から分子ガスが銀河全体に分布する棒渦巻銀河 NGC 3627 に対して、光学的に薄く分子ガスの質量を正確にトレースする  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) と比較的高い臨界密度 ( $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$ ) を持つ  $^{12}\text{CO}$  ( $J=3-2$ ) のマッピング観測を野辺山 45m 鏡と国立天文台がチリのアタカマ砂漠に所有する ASTE 10m 鏡を用いておこなった。さらに、一部の観測点に対しては HCN ( $J=1-0$ ) を野辺山 45m 鏡を用いて観測した。これらの観測により得られた輝線強度図の例として  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) の積分強度図を図 3 に示す。

その結果、棒状構造内での  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) /  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) 比が、中心以外の他の領域と比較して 2-3 倍高いことを発見した。この比が上がる理由としては、銀河中心で見られるような高温・高密度状態か、 $^{13}\text{CO}$  が希薄で速度勾配が大きいことが考えられる。棒状構造の中では  $\text{H}\alpha$  輝線や中間赤外線観測から星形成活動性が見られないことから、前者の可能性は棄却できる。特に棒状構造の中では衝撃波が到達するため、速度勾配が大きくさらに分子雲が破壊され重力的に束縛されていない希薄なガスになっていると予想される。特に、 $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) は正確に分子ガスの質量をトレースしていることから、光学的に厚い条件下で導出された変換係数を使い  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) から求めた分子ガスの質量は棒状構造内では過大評価している可能性がある。さらに、棒状構造内では単位質量のガスからどれくらい星が生まれるかを表す星形成効率が渦状腕に比べて低いことが示唆されていた (Handa et al. 1991) が、

$^{13}\text{CO}(J=1-0)$  から求めた星形成効率は渦状腕と近い値であった。このことから、これまで棒状構造で星形成効率が低いと言われていた理由は、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  から求めた分子ガスの質量が過大評価されていたためであると考えられる。

さらに、我々は棒状構造の両端において、星形成効率が高いことを発見した。さらに、この領域では高密度ガスの割合の指標である  $^{13}\text{CO}(J=3-2)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$  比も高くなっており、何らかの要因により高密度ガスの形成が促進され星形成効率も上昇したと考えられる。そこで重力安定性の指標となる Toomre の  $Q$  値を銀河の回転曲線と  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  から求めた分子ガスの表面密度から計算し、星形成効率と比較したところ、星形成効率の高い棒状構造の両端では、 $Q \sim 1$  で重力的に不安定であることが示唆された。このことから、分子雲の集合体が重力不安定を起こし、より小さな範囲に密集した結果、分子雲同士の衝突頻度が高くなり、圧縮されたガスの密度が高くなり星形成効率が高くなったのではないかと考えられる。

以上のように、我々の研究は棒状構造が銀河内の分子ガスの分布に影響を持ち、銀河中心領域や棒状構造内部の分子ガスの物理状態や星形成活動性に大きな役割を果たすことを観測的に立証し、孤立した銀河における永続的な銀河進化のシナリオを提唱した

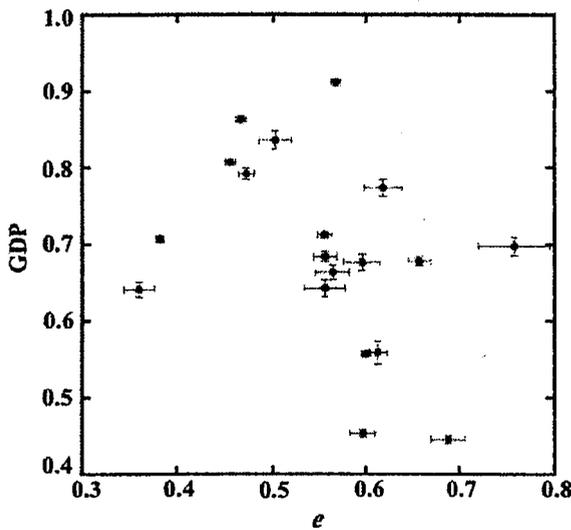


図 1 : GDP-楕円率の相関図

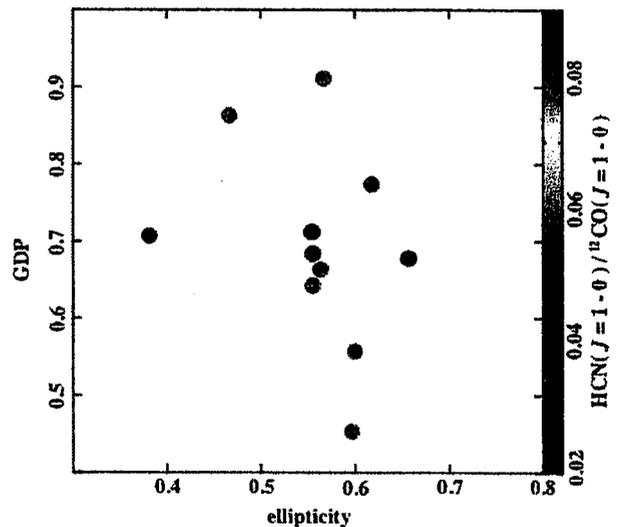


図 2 : GDP-楕円率の相関図上で  $\text{HCN}(J=1-0)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$  比をカラーも用いて示した図。

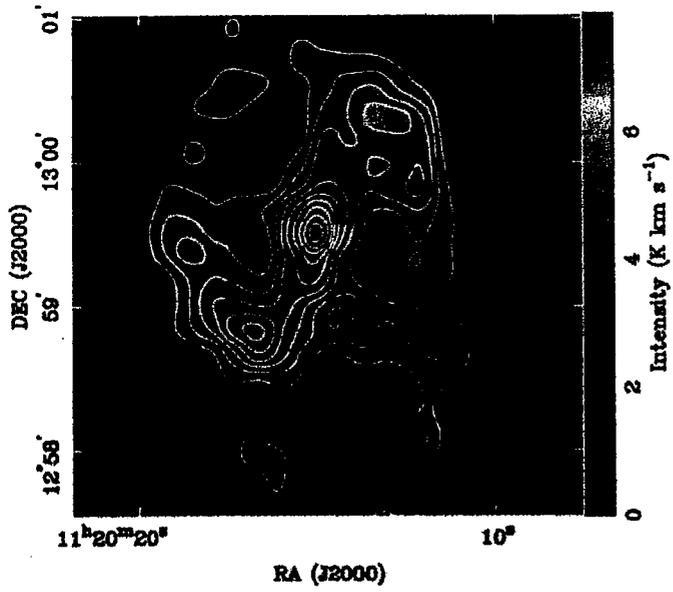


図 3 :  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  の積分強度図(カラー)に  
 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  の積分強度のコントアを重ねた図。

# 学位論文審査の要旨

主査	准教授	羽部朝男
副査	教授	藤本正行
副査	教授	加藤幾芳
副査	教授	渡部重十
副査	助教	徂徠和夫

学位論文題名

## Observational Study of Distribution and Physical State of Molecular Gas and Secular Evolution in Barred Spiral Galaxies

(棒渦巻銀河における分子ガスの分布と物理状態および  
永続的進化に関する観測的研究)

棒渦巻銀河の非軸対称ポテンシャル(以下バーポテンシャル)によって星やガスは棒状部分(以下バー)で激しい非円運動をし、その結果、星形成は大きく影響されると予想される。従来の観測では、バーでの分子ガスの単位質量あたりの星形成率(以下星形成効率)が渦状腕に比べて低いことが示され、その原因として、激しい非円運動により星形成が抑制される可能性が提案されていた。

本論文は、1) 近傍の棒渦巻銀河における分子ガスの分布パターンを定量化し、その進化モデルを提案し、2) 典型的な棒渦巻銀河について、複数の分子スペクトル線のマッピング観測を行い、分子ガスの物理状態の空間分布を明らかにし、大局的なガスの運動が星形成に及ぼす影響を観測事実をもとに研究したものである。

本論文では、近傍の棒渦巻銀河の分子ガスの従来の観測をもとに、分子ガス分布パラメータ(Gas Distribution Parameter = GDP)を導入し、バーポテンシャルの扁平度の指標である楕円率が大きい(バーが強い)ほどGDPが小さい(ガスが銀河中心に集中)という相関をバー内の分子ガスについてはじめて示した。さらにバーの楕円率の大きな銀河ではGDPは大きくばらつき、これが進化段階の違いによる可能性を指摘した。この検証のため、従来の一酸化炭素分子( $^{12}\text{CO } J=1-0$ )観測より密度の高い分子ガスの指標であるHCN  $J=1-0$ のスペクトル線観測を国立天文台45 m電波望遠鏡を用いて行った。結果、楕円率が大きい銀河では、GDPが小さいほど銀河中心領域で高密度分子ガスの割合が高いことを示した。これは、バー・ポテンシャルが強い銀河では、分子ガスの中心集中とともに高密度となり、申請者が指摘した進化モデルを支持している。

次に、典型的な棒渦巻銀河NGC 3627に対して、従来の $^{12}\text{CO } J=1-0$ 観測との比較のために45 m電波望遠鏡を用いて $^{13}\text{CO } J=1-0$ のマッピング観測の結果を行なった。近傍銀河に対する $^{13}\text{CO}$ の銀河全面高感度観測の例は少なく、それ自体重要であり、両スペクトル線の比較から分子ガスの温度と密度の銀河内空間分布を求めたこと、さらにASTE望遠鏡によるサブミリ波帯の $^{12}\text{CO } J=3-2$ の観測により、高密度分子ガス分布を示したことも重要である。加えて、中間赤外線連続光観測、及び可視域のバルマー・スペクトル線観測のアーカイブデータから星形成率、さらに申請者の観測結果も加えて星形成効率を求め、バーの先端(バー・エンド)で星形成効率が非常に高いことを示した。その原因として分子ガスのバー・エンドへの集積の結果、分子ガスの密度が上昇し、星形成を促進する可能性を指摘した。星形成と密接に関係する分子ガスの指標である $^{13}\text{CO}$ 観測をもとに推定した星形成率は渦状腕と同程度であることを示し、従来の $^{12}\text{CO}$ 観測をもとにしたバー部分での低星形成効率はバーでの激しい運動を無視して渦状腕と同様な

「分子雲」状態を仮定したことが原因である可能性を示した。

以上のように、申請者は、棒渦巻き銀河の高密度分子ガスの観測を行い、バーにおける星形成について多くの新たな知見をもたらし、この研究分野に貢献するところが大きい。よって、申請者は北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。